

УДК 550.832.57.519.6:622.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.170341

Використання інтенсивності поглиненого гамма-випромінювання для контролю вмісту заліза в руді

А. А. Азарян, А. М. Гриценко, А. А. Трачук, В. М. Серебренников, Д. В. Швець

Викладено результати математичного моделювання інтенсивності поглиненого гамма-випромінювання для визначення вмісту заліза в ЗРС. Показано, що для підвищення точності оперативного контролю вмісту заліза в ЗРС доцільно використовувати поглинене гамма-випромінювання. Такий підхід є удосконаленням ядерно-фізичного методу визначення вмісту заліза в ЗРС. При існуючих ядерно-фізичних методах визначення вмісту заліза в ЗРС використовується відбите гамма-випромінювання. У досліджуваному методі застосовується гамма-гамма метод, особливістю якого є використання «м'якого» гамма-випромінювання. Це призводить до того, що від опромінюваної поверхні відбивається тільки незначна частина початкового потоку гамма-випромінювання. В результаті вимірювання інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання характеризується значними відносними помилками і, як наслідок, низькою точністю оперативного контролю вмісту заліза в ЗРС. Використання поглиненого гамма-випромінювання, як основної частини потоку гамма-випромінювання, дозволяє значно зменшити відносну помилку вимірювання інтенсивності гамма-випромінювання, тобто підвищити точність оперативного контролю вмісту заліза в ЗРС.

В роботі розглянуто, як найбільш поширений, метод «центральної геометрії» вимірювання інтенсивності гамма-випромінювання. Цей метод дозволяє в математичній моделі враховувати залежність інтенсивності поглиненого гамма-випромінювання не тільки від властивостей опромінюваної поверхні гірської маси, а й від геометричних параметрів при реалізації вимірювань. Основною особливістю моделі є використання параметра альbedo, який дозволяє зв'язати розсіяне і поглинене гамма-випромінювання. Подання синтезованої моделі в безрозмірному вигляді дало можливість як спростити розрахунки, так і узагальнити результати математичного моделювання інтенсивності поглиненого гамма-випромінювання. З метою порівняння величин інтенсивностей відбитого і поглиненого гамма-випромінювань в умовах центральної геометрії були проведені відповідні чисельні розрахунки. Результати проведених розрахунків підтвердили ефективність використання поглиненого гамма-випромінювання для визначення вмісту заліза в ЗРС. Так, в діапазоні 50–60 відсотків вмісту заліза чутливість поглиненого гамма-випромінювання значно вище (в 2 рази), ніж чутливість розсіяного гамма-випромінювання.

Ключові слова: оперативний контроль, поглинені, розсіяні гамма-кванти, ядерно-фізичний метод, детектор, альbedo

1. Введение

Современные требования к качеству добываемого железорудного сырья (ЖРС) указывают на необходимость определения не только точного, но и оперативного определения содержания железа. Одним из путей совершенствования оперативного контроля содержания железа в ЖРС является применение каротажных зондов во взрывных скважинах. В реальных условиях измерение содержания железа в ЖРС с учетом всех факторов, влияющих на точность контроля, является практически неразрешимой задачей. Одним из возможных путей преодоления этих трудностей является использование результата взаимодействия гамма-излучения с ЖРС как источника информации о содержании железа.

Однако используемое при измерении содержания железа отраженное от ЖРС гамма-излучение несет недостаточно информации. Это связано, прежде всего, с малой интенсивностью отраженного потока, и, что особенно важно, по этому потоку можно оценить содержание железа только в поверхностном слое ЖРС. Поэтому представляется целесообразным для измерения содержания железа в ЖРС использовать поглощенное гамма-излучение, которое значительно превышает отраженное гамма-излучение, и позволяет оценить содержание железа внутри ЖРС.

Очевидно, что научные исследования и практическая реализация в данном направлении являются особенно актуальными в современных условиях добычи и переработки ЖРС, поскольку выдвигаются все возрастающие требования по характеристикам конечных продуктов переработки ЖРС.

2. Анализ литературы и постановка проблемы

При оперативном контроле содержания железа в ЖРС наибольшее распространение получили ядернофизические методы. В работе [1] рассмотрено использование упругого рассеяния альфа-частиц с энергией от 6,5 до 280 МэВ для анализа дифференциальных сечений. Учитывая, что для оперативного контроля качества руд черных металлов используются радионуклиды с энергией не более 300 кэВ, то для оперативного контроля содержания железа в руде данный метод неприемлем. В работе [2] исследуются различные типы сцинтилляционных монокристаллов: германиевый и NaI, активированный таллием (Tl), для спектрометрических устройств. Для оперативного контроля качества минерального сырья в условиях горнорудного производства спектрометрические приборы не технологичны, учитывая их низкую экспрессность и дороговизну.

В работе [3] приведены результаты исследования влияния диаметра коллимационного канала на величину массового коэффициента ослабления в диапазоне энергии от 59.5 до 662 кэВ. В работе используется низкоэнергетический источник америций-241 с фиксированным диаметром коллимации.

В статье [4] рассмотрена методика регистрации комптоновского рассеяния гамма-лучей с использованием двух слоев детектора, первый для обнаружения электрона отдачи, а второй – для рассеянного гамма-излучения. В данной работе

используется источник с энергией 511 кэВ. Учитывая, что с увеличением энергии источника излучения повышается как его стоимость, так и требования по радиационной безопасности, то подобное предложение не может быть использовано для контроля качества руд черных металлов в условиях шахт, ГОКов и РОФ.

В статье [5] описаны эксперименты по использованию Комптон-эффекта для определения толщины алюминиевых и железных листов. Однако, учитывая тот факт, что железные руды представляют собой квазибинарную среду, то результаты этих исследований нецелесообразно использовать в горнорудной промышленности. В работе [6] предлагается использовать комптоновское рассеяние для диагностики металлических поверхностей. Предлагаемый метод использует рентгеновское излучение и применяется, в основном, для получения двумерной матрицы, представляющей распределение обратного рассеяния. Данный подход является сугубо стационарным и не может быть использован для оперативного контроля содержания полезного компонента в руде в условиях рудообогатительной фабрики (РОФ) и шахт.

Исследования использования рассеянного гамма-излучения для контроля качества ЖРС проводились авторами [7], однако в работе не был рассмотрен вопрос учета поглощенного гамма-излучения.

Среди рассматриваемых публикаций обращает на себя внимание работа [8], в которой авторы предложили использовать для измерения содержания железа поглощенное в ЖРС гамма-излучение. Было отмечено, что такой способ увеличивает точность измерения содержания железа. Однако конкретных рекомендаций по реализации рассматриваемого подхода в работе не дано. Необходимо отметить, что помимо ядерно-физических методов измерения содержания железа в ЖРС применяются и другие. В частности, в работе [9] описываются магнитометрические методы, позволяющие определять только содержание магнитного железа в ЖРС. Это существенно ограничивает их применение, поскольку в составе ЖРС значительную часть составляет окисленное, то есть немагнитное, железо. В работе [10] внимание уделяется ультразвуковым методам измерения содержания железа в ЖРС. Вместе с тем, авторы подчеркивают, что вследствие своей громоздкости, эти методы практически неприменимы для использования в ограниченных пространствах, например, при каротаже взрывных скважин.

В работе [11] описано применение метода Мёссбауэровской спектроскопии для исследования вещественного состава железомарганцевых руд. Однако метод Мёссбауэровской спектроскопии не обладает необходимым уровнем оперативности и требует использования дорогостоящего оборудования. В труде [12] рассмотрено использование данного метода для определения содержания железа в грунте. Несмотря на достаточно высокую чувствительность, метод не может быть использован в условиях горнометаллургической промышленности из-за громоздкости и высокой стоимости.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что, безусловно, целесообразным является проведение исследований, посвященных использованию поглощенного гамма-излучения для измерений содержания

железа в ЖРС. Математическое моделирование таких измерений позволит найти способы эффективной организации исследуемых процессов, избегая метода «проб и ошибок».

3. Цель и задачи исследования

Цель исследований – использование поглощенного гамма-излучения для оперативного контроля содержания железа в ЖРС вследствие существования зависимости интенсивности поглощенного гамма-излучения от содержания железа в ЖРС.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- разработать математическую модель расчета интенсивности поглощенного гамма-излучения для оперативного контроля содержания железа в ЖРС;
- провести сравнительный анализ интенсивностей поглощенного и отраженного гамма-излучений при оперативном контроле содержания железа в ЖРС.

4. Материалы и методы исследования

Для оперативного контроля качества руд черных металлов в различных условиях добычи и переработки наиболее применимыми являются ядернофизические методы. При этом важен оптимальный выбор энергии и активности источника гамма-излучения.

Практическое применение ядернофизических методов показало, что для оперативного контроля качества минерального сырья наиболее подходящими являются источники гамма-излучения с энергией $E \leq 300$ кэВ. Из числа известных источников, для контроля качества ЖРС целесообразно использовать источник гамма-излучения на основе изотопа Америций-241 с энергией излучения 60 кэВ, которая обеспечивает необходимую чувствительность к изменению массовой доли полезного компонента в горной массе и является более безопасным в эксплуатации благодаря своей низкоэнергетичности.

При взаимодействии гамма-квантов с горными породами, в указанном диапазоне энергии, имеются три вида вторичного излучения: это обратно рассеянное $N_{\text{рас}}$, прошедшее $N_{\text{пр}}$ и поглощенное $N_{\text{погл}}$. Сумма всех трех видов вторичного излучения составляет интенсивность источника гамма-излучения N_0 и определяется как

$$N_0 = N_{\text{рас}} + N_{\text{пр}} + N_{\text{погл}}. \quad (1)$$

В настоящее время практически все измерительные устройства в горнорудной промышленности основываются на измерении и сопоставлении интенсивности рассеянного гамма-излучения с содержанием полезного компонента. Доля обратно рассеянного излучения в уравнении (1) достаточно невелика, что не обеспечивает необходимую точность оперативного контроля качества минерального сырья.

Поэтому предложено проверить возможность использования интенсивности поглощенного гамма-излучения для оперативного контроля содержания железа в ЖРС.

Особенность математического моделирования процесса измерения содержания железа в ЖРС состоит в построении такой модели, которая учитывала бы зависимость интенсивности поглощенного потока гамма-излучения от измеряемых параметров. При центральной геометрии облучения ЖРС наряду с интенсивностью источника гамма-излучения измеряемыми параметрами являются геометрические: расстояние между источником излучения и детектором, расстояние между детектором и отражающей поверхностью.

Синтез модели для оценки содержания железа в ЖРС логично начинать с известных и апробированных практикой формул, описывающих распространение потока гамма-излучения в среде [13]. Схема моделируемого взаимодействия гамма-излучения с веществом приведена на рис. 1.

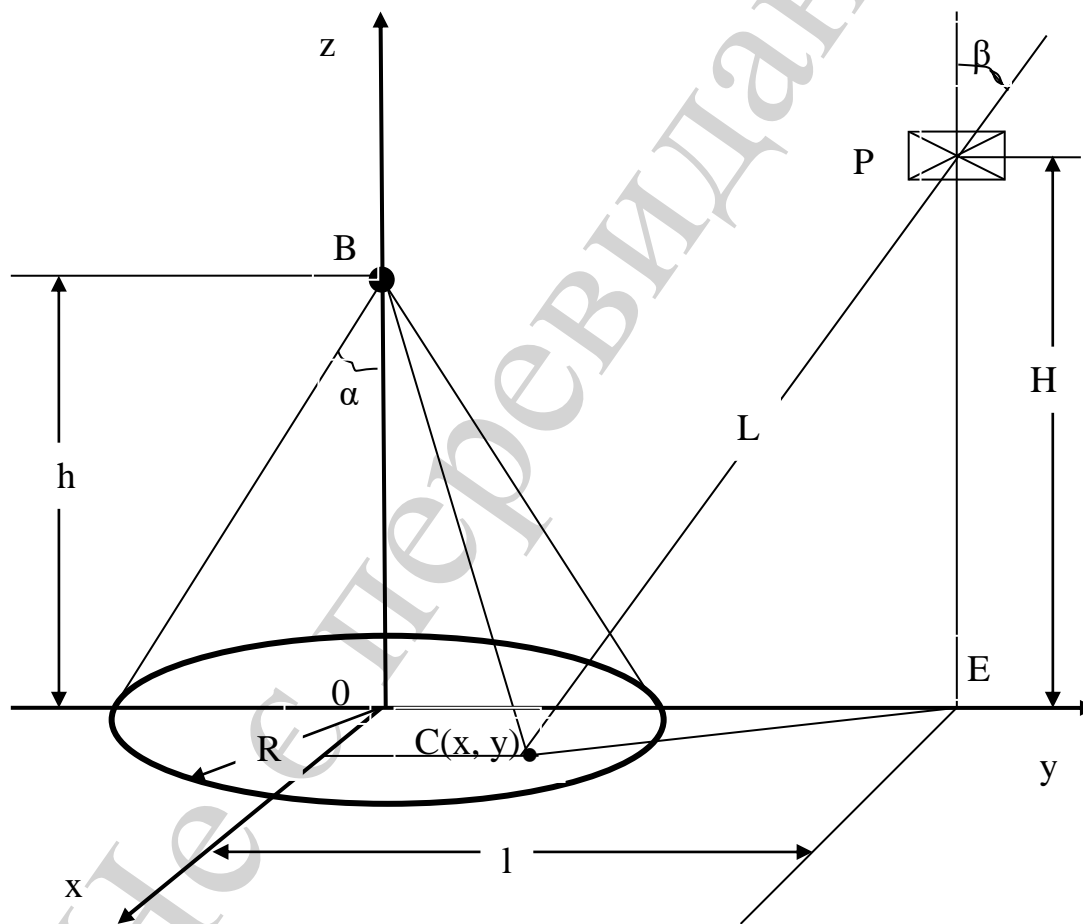


Рис. 1. Схема взаимодействия гамма-излучения с веществом

Поток гамма-квантов исходит из точки B в виде кругового конуса с углом раствора конуса 2α . Далее, этот поток достигает облучаемой поверхности, образуя «пятно» в виде круга. Каждая точка этого «пятна» является источником вторичного (отраженного) гамма-излучения. Отраженное гамма-излучение несет необходимую информацию о состоянии ЖРС, которая включает сведения и о

содержании железа в нем [14, 15]. Детектор, расположенный в точке P , регистрирует и измеряет величину интенсивности гамма-излучения. Согласно схеме распространения гамма-излучения, представленной на рис. 1, элемент интенсивности потока гамма-излучения, достигшего облучаемой поверхности в точке $C(x, y)$, из источника гамма-излучения интенсивностью Q , расположенного в точке B , записывается в виде

$$dN(x, y) = \frac{Q \cdot h}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} dx dy, \quad (2)$$

где Q – интенсивность источника гамма-излучения, 1/сек, h – расстояние от источника гамма-излучения до облучаемой поверхности, м, $dx dy$ – элемент площади в декартовой системе координат, м².

Тогда полная интенсивность потока гамма-излучения, достигшего поверхности, находится путем интегрирования по области D в виде круга

$$N = Q \cdot h \iint_D \frac{dx dy}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (3)$$

Для вычисления двойного интеграла (3) нужно свести его к повторным интегралам. Область интегрирования D ограничена окружностью, каноническое уравнение которого имеет вид,

$$x^2 + y^2 = R^2, \quad (4)$$

где R – радиус окружности, ограничивающей «пятно» на поверхности облучения, м. При переходе к полярным координатам

$$x = R \cdot \cos \phi, \quad y = R \cdot \sin \phi,$$

уравнение (4) запишется в виде

$$r = R, \quad (0 \leq \phi < 2 \cdot \pi). \quad (5)$$

Согласно (5), интеграл (3) примет вид

$$N = Q \cdot h \iint_{D^*} \frac{1}{(r^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} r dr d\phi, \quad (6)$$

где $r \cdot dr d\phi$ – элемент площади в полярных координатах, м²; $D^* = \{(r; \phi) \mid r = R; 0 \leq \phi < 2 \cdot \pi\}$ – область интегрирования в полярных координатах.

Для вычисления двойного интеграла (6) нужно свести его к повторным интегралам. Учитывая границы интегрирования, двойной интеграл (6) запишется в виде

$$N = Q \cdot h \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^R \frac{rdr}{(r^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (7)$$

Интегрируя, находим

$$N = 2\pi \cdot Q \cdot \left(1 - \frac{h}{\sqrt{R^2 + h^2}} \right). \quad (8)$$

Принимая во внимание, что радиус окружности «пятна» на поверхности облучения находится по формуле

$$R = h \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

формула (8) приводится к виду

$$N = 2\pi \cdot Q \cdot \sin^2 \alpha. \quad (9)$$

Тогда интенсивность потока гамма-излучения, отраженного от поверхности, находится по формуле

$$M = 2\pi \cdot Q \cdot A \cdot \sin^2 \alpha, \quad (10)$$

где A – коэффициент альбедо.

Коэффициент альбедо A показывает долю интенсивности падающего на поверхность облучения потока, отраженного от облучаемой поверхности. Очевидно, что интенсивность поглощенного потока гамма-излучения может быть найдена как разность (9) и (10)

$$N_n = N - M$$

или

$$N_n = 2\pi \cdot Q \cdot \sin^2 \alpha \cdot (1 - A). \quad (11)$$

В свою очередь, элемент интенсивности потока гамма-излучения, определяемой формулой (2), является источником вторичного гамма-излучения. При этом интенсивность вторичного потока гамма-излучения, попадающего в детектор, расположенный в точке P , из точки $C(x, y)$ находится по формуле

$$dM(x, y) = \frac{A \cdot h \cdot S}{L^3(x, y)} dN(x, y), \quad (12)$$

где $L(x, y)$ – расстояние от т. $C(x, y)$ до т. P расположения детектора, м; S – площадь детектора, м².

Согласно схеме распространения потока гамма-излучения, представленной на рис.1, можно записать [16]

$$L(x, y) = \sqrt{x^2 + (l - y)^2 + H^2}, \quad (13)$$

где l – расстояние между источником излучения и детектором, м.

Принимая во внимание (2) и (13), формула (12) принимает вид

$$dM(x, y) = \frac{Q \cdot A \cdot h \cdot H \cdot S}{((x^2 + y^2 + h^2)(x^2 + (l - y)^2 + H^2))^{1.5}} dx dy. \quad (14)$$

Для нахождения суммарной интенсивности вторичного потока гамма-излучения, попадающего в детектор, необходимо провести интегрирование по области D

$$M = Q \cdot A \cdot h \cdot H \cdot S \iint_D \frac{dx dy}{((x^2 + y^2 + h^2)(x^2 + (l - y)^2 + H^2))^{1.5}}. \quad (15)$$

Для вычисления двойного интеграла (15) нужно свести его к повторным интегралам. Путем перехода к полярным координатам интеграл (15) приводится к повторным интегралам и принимает вид

$$M = Q \cdot A \cdot h \cdot H \cdot S \cdot \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{h \cdot \operatorname{tg} \alpha} \frac{r dr}{((r^2 + h^2)(r^2 - 2r \cdot l \cdot \sin \phi + l^2 + H^2))^{\frac{3}{2}}}. \quad (16)$$

Формула (16) позволяет найти величину коэффициента альбедо по величине интенсивности потока отраженного гамма-излучения, измеряемого детектором,

$$A = \frac{M}{Q \cdot h \cdot H \cdot S \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{h \cdot \operatorname{tg} \alpha} \frac{r dr}{((r^2 + h^2)(r^2 - 2rl \sin \phi + l^2 + H^2))^{1.5}}}. \quad (17)$$

Тогда, учитывая (17), формула (11) принимает вид

$$N_n = 2\pi \cdot Q \cdot \sin^2 \alpha \times \left(1 - \frac{M}{Q \cdot h \cdot H \cdot S \cdot \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{h \cdot \tan \alpha} \frac{r dr}{((r^2 + h^2)(r^2 - 2l \cdot r \sin \phi + l^2 + H^2))^{1.5}}} \right). \quad (18)$$

Анализ формулы (18) показывает, что интенсивность поглощенного потока гамма-излучения N_n зависит от семи переменных: Q, M, S, h, H, l, α . Исследование формулы (18), как функции семи переменных, вызывает определенные затруднения. Поэтому исключительное значение имеет вопрос о числе существенных переменных, определяемых как комбинации семи переменных. Применение теории подобия и анализа размерностей [17,18] позволяет представить формулу (18) в виде

$$N'_n = 2\pi \cdot \sin^2 \alpha \times \left(1 - \frac{M'}{H' \cdot S' \cdot \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\tan \alpha} \frac{\hat{r} d\hat{r}}{((r'^2 + 1)(r'^2 - 2l' \cdot r' \sin \phi + l'^2 + H'^2))^{1.5}}} \right), \quad (19)$$

где $N'_n = N_n/Q, M' = M/Q, H' = H/Q, r' = r/h, l' = l/h$.

Анализ формулы (19) показывает, что число существенных переменных равно пяти, то есть уменьшилось на две единицы.

С целью сравнения величин отраженного и поглощенного гамма-излучений при облучении образцов в условиях центральной геометрии были проведены соответствующие численные расчеты. Для этого было составлено отношение (20) к (11), позволяющее в безразмерном виде оценить соответствующую величину

$$E = \frac{A}{1 - A} \frac{H' \cdot S'}{2\pi \sin^2 \alpha} \times \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\tan \alpha} \frac{r' dr'}{((r'^2 + 1)(r'^2 - 2r' \cdot l' \cdot \sin \phi + l'^2 + H'^2))^{\frac{3}{2}}}, \quad (20)$$

где $E = M/N_n, S' = S/h^2$.

5. Результаты исследований по разработке математической модели расчета интенсивности поглощенного гамма-излучения для оперативного контроля содержания железа в ЖРС

Вычисления по формуле (20) были проведены с помощью программного комплекса Mathcad [19]. При расчетах были приняты величины параметров $H' = 1$,

$S'=1$. На рис. 2 приведены графики зависимости отношения E , вычисленного по формуле (20), в зависимости расстояния l' , при различных величинах альбедо A .

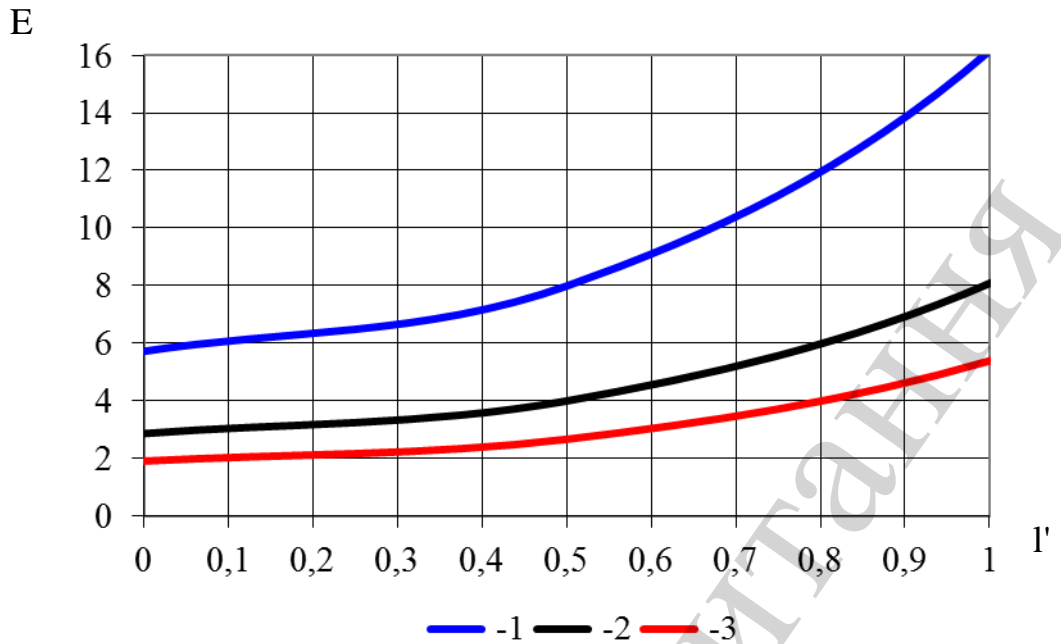


Рис. 2. Зависимость отношения E от расстояния l' для различных величин альбедо A

Графики, приведенные на рис. 2, показывают, что доля отраженной интенсивности гамма-излучения по сравнению с поглощенной интенсивностью гамма-излучения по мере увеличения расстояния между источником излучения и детектором уменьшается. Причем при уменьшении альбедо эта доля становится меньше. Полученный результат позволяет сделать вывод о целесообразности при измерении содержания железа в ЖРС использования интенсивности поглощенного гамма-излучения, поскольку это приводит к меньшим ошибкам. Оценка величины содержания железа в ЖРС должна проводиться по формуле (19), которая, используя информацию об интенсивности отраженного потока гамма-излучения, дает возможность вычислить интенсивность поглощенного потока гамма-излучения, без применения альбедо.

Формула (19) позволяет оценить чувствительность интенсивности поглощенного потока гамма-излучения относительно интенсивности отраженного потока гамма-излучения, измеренного детектором. Для этого формула (19) записывается в виде

$$\frac{dN_n}{dM} = - \frac{2\pi \cdot \sin^2 \alpha}{\hat{H} \cdot \hat{S} \cdot \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\operatorname{tg} \alpha} \frac{\hat{r} d\hat{r}}{((\hat{r}^2 + 1)(\hat{r}^2 - 2\hat{l} \cdot \hat{r} \sin \phi + \hat{l}^2 + \hat{H}^2))^{1.5}}}. \quad (21)$$

На рис. 3 приведены результаты расчетов по формуле (21) при $S'=0,7$.

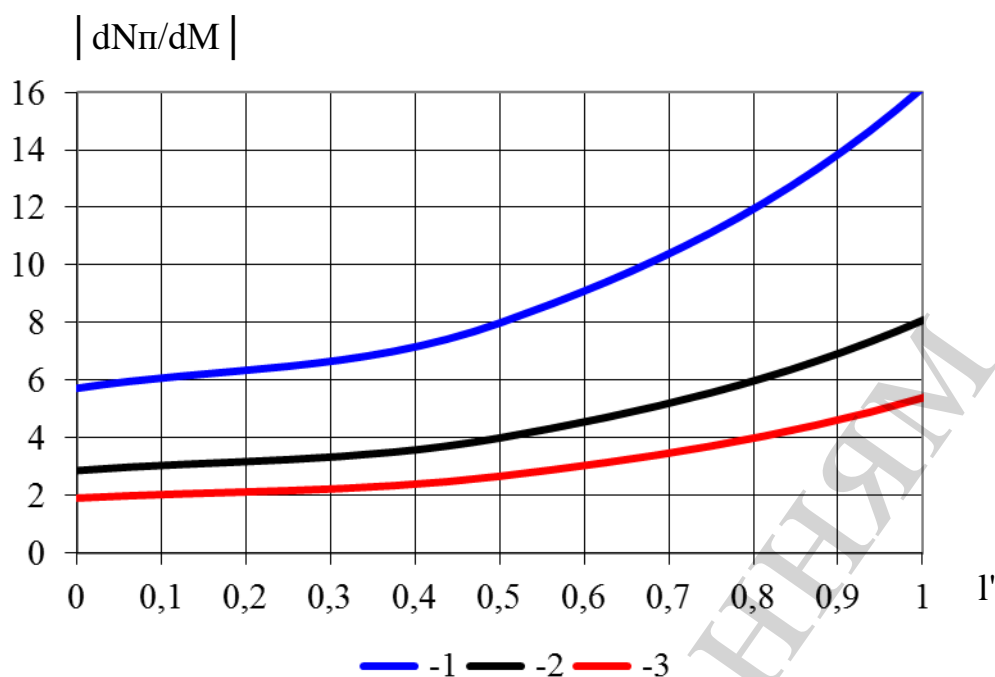


Рис. 3. Зависимость чувствительности от расстояния l' : 1 – $H'=0,5$; 2 – $H'=1,0$; 3 – $H'=1,5$

Графики, приведенные на рис. 3, показывают, что чувствительность интенсивности поглощенного потока гамма-излучения относительно интенсивности отраженного потока гамма-излучения по мере увеличения расстояния между источником излучения и детектором увеличивается. Более того, при уменьшении высоты детектора над облучаемой поверхностью эта чувствительность возрастает.

С целью установления и учета интенсивности, поглощенных гамма-квантов для контроля качества минерального сырья были отобраны представительные образцы руды в диапазоне содержания Fe 10–60 %.

Как было показано в уравнении (1), при взаимодействии гамма-излучения с горными породами возникают три вида вторичного излучения. С учетом «толщины насыщения» пробы, пренебрегаем интенсивностью прошедшего гамма-излучения. При этом выражение (1) примет вид

$$N_0 = C \cdot N_{\text{рас}} + N_{\text{погл.}} \quad (22)$$

C является безразмерным, поправочным коэффициентом, который учитывает количество незарегистрированных обратно рассеянных гамма-квантов. Данный коэффициент есть функция от площади монокристалла датчика, энергии, активности радионуклида и от расстояния «источник-проба-датчик».

Численное значение C в зависимости от активности источника может принимать значения от 1,7 до 3,5.

По результатам исследования построены графики зависимостей интенсивности рассеянного и поглощенного гамма-излучения от содержания железа в ЖРС (рис. 4).

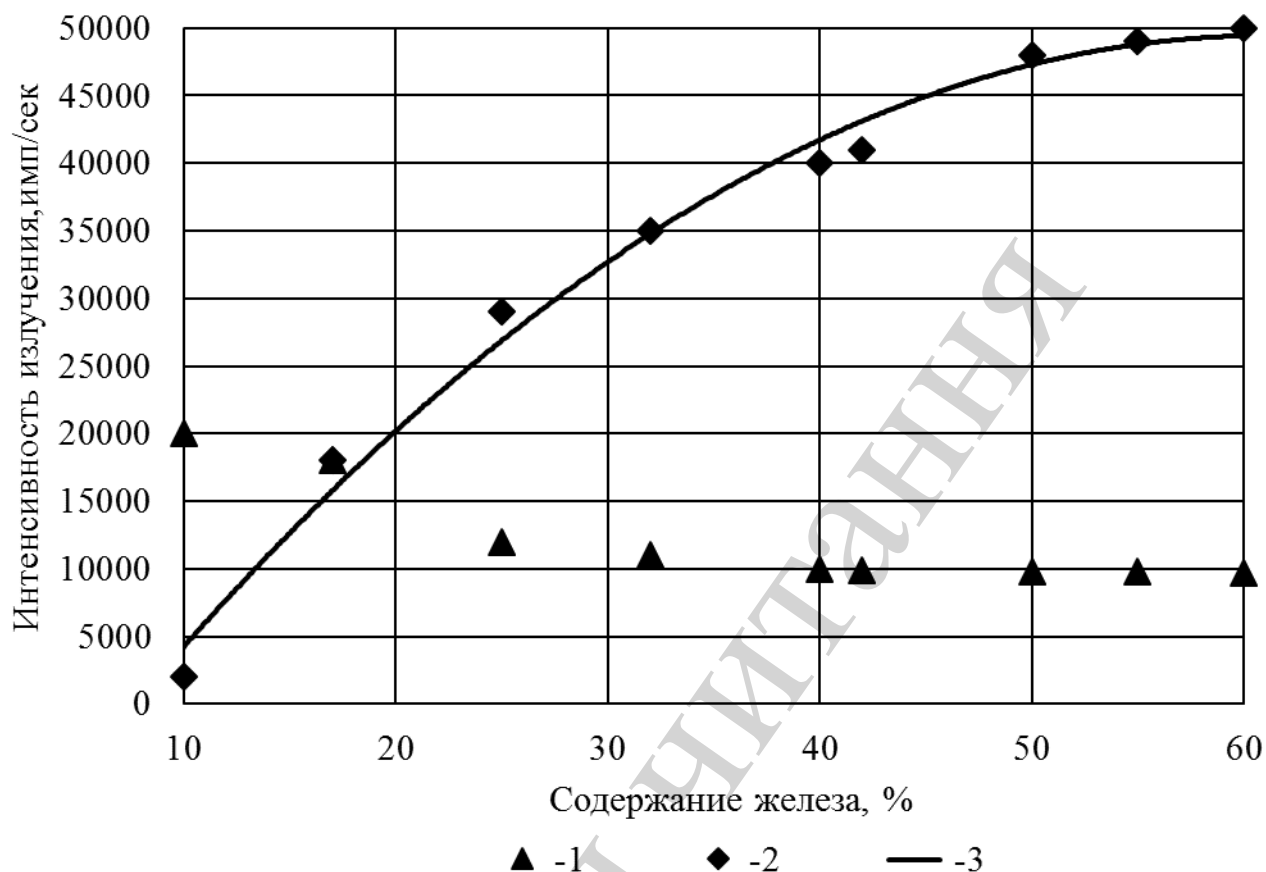


Рис. 4. Зависимость интенсивности рассеянного и поглощенного гамма-излучения от содержания железа в руде: 1 – рассеянное излучение, 2 – поглощенное излучение, 3 – аппроксимация

Из графика видно, что интенсивности рассеянного и поглощенного гамма-излучения равны при содержании полезного компонента $Fe = 17 \%$.

Из зависимости 1 (рис. 4) видно, что при содержании $Fe \geq 40 \%$ интенсивность рассеянного излучения резко снижается и попадает в зону слабой чувствительности.

Учитывая, что на международном рынке конкурентоспособным является ЖРС с содержанием $Fe \geq 65 \%$, то целесообразность использования интенсивности поглощенного гамма-излучения для оперативного контроля качества руды в области высокого содержания железа становится еще более актуальной.

Чувствительность определяется по формуле

$$K = (N_1 - N_2) / (Fe_1 - Fe_2) = \Delta N / \Delta Fe. \quad (23)$$

Чувствительность для рассеянного и поглощенного гамма-излучения в диапазоне 50–60 процентов содержания железа составляет

$$K_{\text{рас.}} = 500 / 10 = 50 \text{ имп/\%};$$

$$K_{\text{погл.}}=1000/10=100 \text{ имп/\%}.$$

Видно, что чувствительность поглощенного гамма-излучения значительно выше (в 2 раза), чем чувствительность рассеянного гамма-излучения.

Коэффициент детерминации между расчетными и экспериментальными данными составляет $R^2=0,98$.

6. Обсуждение результатов исследований по использованию интенсивности поглощенного гамма-излучения ЖРС для измерения содержания железа.

Идея данной работы заключается в поиске путей повышения точности контроля содержания полезного компонента в железорудном сырье, в области массовой доли $\text{Fe}>40 \%$.

Анализ результатов исследования по использованию интенсивности поглощенного гамма-излучения ЖРС для измерения содержания железа дал возможность объяснить полученные результаты особенностями ядернофизического взаимодействия гамма-квантов низкой энергии с веществом. Преимущество предлагаемых решений состоит в том, что при увеличении содержания железа в ЖРС до 50–60 % чувствительность поглощенного гамма-излучения значительно выше (в 2 раза), чем чувствительность рассеянного гамма-излучения. Таким образом, полученные результаты исследований по использованию интенсивности поглощенного гамма-излучения ЖРС подтверждают повышение точности оперативного контроля содержания железа. Необходимо подчеркнуть, что альтернативные методы измерения содержания железа, основанные на измерении интенсивности рассеянного гамма-излучения, теряют свою эффективность при возрастании содержания железа в ЖРС $\text{Fe}>40 \%$.

Необходимо подчеркнуть, что результаты, полученные, как при проведении экспериментов, так и путем математического моделирования, указали направление разработок с целью практического внедрения. Приборы, сконструированные на основе исследуемой проблемы, позволят реализовать такой контроль содержания железа, который повысит эффективность и требуемое качество производственных процессов горнометаллургического цикла. Вместе с тем, нужно отметить, что при планировании дальнейших исследований могут возникнуть проблемы измерения содержания железа в ЖРС, связанные с геологическими особенностями разрабатываемых месторождений. Учет таких особенностей потребует привязки исследований к конкретным условиям добычи ЖРС.

Несовершенством предлагаемого метода является отсутствие технической возможности непосредственной регистрации интенсивности поглощенного рудой гамма-излучения.

7. Выводы

1. Разработана математическая модель расчета интенсивности поглощенного гамма-излучения для оперативного контроля содержания железа в ЖРС, особенностью которой является применение центральной геометрии при

конструировании приборов измерения содержания железа в ЖРС. Новизна моделирования состоит в том, что с учетом известных законов взаимодействия гамма-излучения с веществом, при наличии центральной геометрии измерения была получена структура модели, которая является существенно нелинейной. Наличие статистического материала по измерению содержания железа в ЖРС дает возможность, пользуясь средствами ИТ-технологий, найти параметры, содержащиеся в структуре. Особенность синтезированной модели состоит также в том, что существует возможность адаптации модели к изменяющимся условиям измерения содержания железа в ЖРС, связанные, например, с геологическими условиями месторождения ЖРС. Адекватность математической модели подтверждается как статистическими оценками, в частности коэффициентом детерминации, так и результатами экспериментов.

Доказано, что при содержании железа больше 50% в ЖРС расчет содержания железа в ЖРС на основе определения интенсивности поглощенного гамма-излучения более эффективен по сравнению с существующим методом, основанным на учете интенсивности отраженного гамма-излучения. При этом, в рассматриваемом диапазоне содержания железа в ЖРС чувствительность измерения содержания железа в ЖРС по интенсивности поглощенного гамма-излучения значительно выше (в 2 раза), чем чувствительность измерения содержания железа в ЖРС по интенсивности рассеянного гамма-излучения.

2. Опытным путем проведен сравнительный анализ интенсивностей поглощенного и отраженного гамма-излучений в ЖРС в зависимости от содержания железа с целью оперативного контроля содержания железа в ЖРС. Установлено, что при содержании железа больше 50% в ЖРС чувствительность измерения содержания железа по интенсивности поглощенного гамма-излучения значительно выше (в 2 раза), чем чувствительность измерения содержания железа в ЖРС по интенсивности рассеянного гамма-излучения. Коэффициент детерминации между расчетными и экспериментальными данными при этом составляет 0,98.

Литература

1. Ibraheem A. A., Algahatani F. Analysis of alpha particles scattered from ^{32}S at 386 MeV // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1976. P. 020022. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5042389>
2. Experimental and simulated study of detector collimation for a portable 3"×3" NaI(Tl) detector system for in-situ measurements / Kiran K. U., Ravindraswami K., Eshwarappa K. M., Somashekarappa H. M. // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2015. Vol. 8, Issue 4. P. 597–605. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.07.006>
3. Çelik N., Çevik U., Çelik A. Effect of detector collimation on the measured mass attenuation coefficients of some elements for 59.5–661.6keV gamma-rays // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2012. Vol. 281. P. 8–14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.04.003>
4. Makek M., Bosnar D., Pavelić L. Scintillator Pixel Detectors for

Measurement of Compton Scattering // Condensed Matter. 2019. Vol. 4, Issue 1. P. 24. doi: <https://doi.org/10.3390/condmat4010024>

5. Díaz-H K. V., Cristancho F. Effect of sample thickness on 511 keV single Compton-scattered gamma rays // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1753. P. 080001. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4955371>

6. The application possibilities of the gamma-ray Compton backscattering technique / Flechas D., Sarmiento L. G., González N., Gómez-Muñoz J., Garzón C., Fajardo E., Cristancho F. // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1529. P. 40. doi: <https://doi.org/10.1063/1.4804078>

7. Математическая модель взаимодействия гамма-излучения с горными породами как источник информации о содержании железа при каротаже взрывных скважин / Азарян А. А., Азарян В. А., Гриценко А. Н., Трачук А. А., Серебrenиков В. М. // XXXIII Міжнародна конференція «Розвиток науки в XXI столітті». Харків, 2018. С. 40–48.

8. Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / Azaryan A., Gritsenko A., Trachuk A., Shvets D. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 5, Issue 5 (95). P. 13–19. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144003>

9. Азарян А. А., Дрыга В. В., Цыбулевский Ю. Е. Исследование автогенераторного метода контроля содержания железа магнитного в продуктах обогащения // Качество минерального сырья. 2005. С. 117–123.

10. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. The study of volume ultrasonic waves propagation in the gas-containing iron ore pulp // Ultrasonics. 2015. Vol. 56. P. 340–343. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.08.022>

11. Studying phase structure of burned ferrous manganese ores by method of nuclear gamma-resonance spectroscopy / Shayakhmetov B., Issagulov A., Baisanov A., Karakeyeva G., Issagulova D. // Metalurgija. 2014. Vol. 53, Issue 2. P. 231–234.

12. XRD, internal field-NMR and Mössbauer spectroscopy study of composition, structure and magnetic properties of iron oxide phases in iron ores / Manjunatha M., Kumar R., Anupama A. V., Khopkar V. B., Damle R., Ramesh K. P., Sahoo B. // Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8, Issue 2. P. 2192–2200. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.022>

13. Машкович В. П., Кудрявцева А. В. Защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 495 с.

14. Азарян А. А., Серебrenиков В. М. Математическое моделирование ядернофизических методов анализа хромовых руд // Горный журнал. 1988. № 6. С. 25–27.

15. Mossbauer forward scattering spectra of ferromagnets in radio-frequency magnetic field / Dzyublik A. Ya., Sadykov E. K., Petrov G. I., Arinin V. V., Vagizov F. H., Spivak V. Yu. // Yaderna fizyka ta enerhetyka. 2013. Vol. 13, Issue 1. P. 73–82. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/yadf_2013_13_1_12

16. Шипачев В. С. Курс высшей математики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 280 с.

17. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.

18. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 432 с.
19. Макаров Е. Г. Mathcad: Учебный курс. СПб.: Питер, 2009. 384 с.
20. Development of the method for modeling operational processes for tasks related to decision making / Lutsenko I., Oksanych I., Shevchenko I., Karabut N. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 4 (92). P. 26–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126446>
21. Formal signs determination of efficiency assessment indicators for the operation with the distributed parameters / Lutsenko I., Fomovskaya E., Oksanych I., Vikhrova E., Serdiuk O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 1, Issue 4 (85). P. 24–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91025>
22. Azaryan A. Research of influence of monocrystal thickness NAJ(TL) on the intensity of the integrated flux of scattered gamma radiation // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Issue 2. P. 43–46.
23. Azaryan A., Gritsenko A. Mobile station for logging of blast holes // Novi tehnologii. 2011. Issue 4. P. 52–55.
24. Azaryan A., Azaryan V. Use of Bourger-Lambert-Bera law for the operative control and quality management of mineral raw materials // Metallurgical and Mining Industry. 2015. Issue 1. P. 4–8.
25. Швец Д. В. Автоматическое управление процессом измельчения магнетитовых руд на основе определения их прочности // Сборник научных трудов "Качество минерального сырья". 2018. Т. 2.
26. Azaryan A., Pikilnyak A., Shvets D. Complex automation system of iron ore preparation for beneficiation // Metallurgical and mining industry. 2015. Issue 8. P. 64–66.
27. Investigation of the effect of characteristics of gas-containing suspensions on the parameters of the process of ultrasonic wave propagation / Morkun V., Morkun N., Tron V., Hryshchenko S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, Issue 5 (90). P. 49–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118943>
28. Поркуян О. В., Сотникова Т. Г. Комбинированный метод определения относительного содержания магнетита в твердой фазе железорудной пульпы // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ". 2010. № 12. С. 29–36.
29. Вальтер А. К., Залюбовский И. И. Ядерная физика. Харьков: Основа, 1991. 480 с.
30. Татарников А. П. Ядернофизические методы обогащения полезных ископаемых. М.: Атомиздат, 1974. 145 с.
31. Плаксин И. Н., Старчик Л. П. Ядерно-физические методы контроля вещественного состава: ядерные реакции и активационный анализ. М.: Наука, 1966. 204 с.
32. Якубович А. Л., Зайцев Е. И., Пржиялговский С. М. Ядерно-физические методы анализа горных пород. М.: Энергоатомиздат, 1982. 264 с.
33. Фролов В. В. Ядерно-физические методы контроля делящихся веществ. М.: Атомиздат, 1976. 128 с.